

ROSAT X-선위성시대의 자기격변변광성 연구

충북대 천문우주학과 김 용 기

지난 50년동안 항성 천문학은 X-선 관측기술의 도입으로 엄청난 도약을 거듭해 왔다. 특히 밀도가 아주 높은 천체(백색왜성, 중성자별, 블랙홀)에서 관측되는 높은 에너지의 X-선 복사파가 물질모임(accretion)에 기인한다는 것이 이론적으로 이해되면서 밀집성(compact star)에로의 물질모임 물리(accretion physics)는 많은 천문학자들의 관심을 받는 중요한 분야가 되었다. 이에 최근 X-선 천문학 분야에서 상당히 중요한 관측자료를 제공하고 있는 ROSAT X-선 위성이 자기격변 변광성 연구에 미치고 있는 영향들을 정리해 보고자 한다.

1. ROSAT X-선 위성

ROSAT는 ROentgen-SATellite란 독일어의 약자인데, 독일 과학자 J. Truemper 박사의 주도로 1990년 6월 미국 Deltar로켓에 의해 발사된 X-선 인공위성이다. 이 인공위성의 이름은 X-선을 발견한 독일의 물리학자 뢰트겐(Roentgen)을 따서 붙여졌고, Einstein 인공위성과 아주 흡사한 구조를 지니고 있다. 주요 관측장비인 X-선 망원경은 2keV보다 낮은 광자에너지에 아주 민감하게 제작되었고, 유효 X-선 집광면적은 Einstein 위성보다 두배나 크다. 그러나 ROSAT는 2keV보다 큰 광자에너지에는 민감하지 않다. 입사되는 X-선은 두 개의 영상탐지기(image detector)에 초점이 잡혀진다.

하나의 영상탐지기는 가스가 채워진 위치에 민감한 비례계수기(PSPC, position sensitive proportional counter)로, 초점이 맞춰졌을 때 직경 2도 정도의 시상(field of view)을 지닌다. 발사 된지 첫 6개월동안 PSPC가 전천 탐사(all sky survey)를 하면서 하늘을 균일하게 관측했다고 하면, 모든 천체들이 약 1000초 정도 관측되어졌을 것이다. 이는 5×10^4 의 X-선 원이 이 전천 탐사에 의해 탐지될 수 있을거라는 예측을 가능하게 한다. 이는 알려진 X-선 원의 수를 엄청나게 증가시켰고, 지금까지 가장 민감했던 전천 탐사인 HEAO-1 전천 탐사에서 발견된 숫자보다 100배 이상을 X-선원의 동정을 가능하게 하였다. 이는 한 개의 X-선원의 성질을 동정하고 규명하는데 몇 주일, 몇 달 걸렸던 그전에 비하면 엄청난 일이었다. 그래서 상당히 밝은 X-선원들의 새로운 부류가 발견될 가능성이 있다. 두번째 탐지기는 고해상도 영상 사진기(HRI, High resolution imager)로 Einstein 위성에 탑재된 것과 비슷하다. 광자에 민감한 표면이 낮은 에너지의 X-선(soft X-선)을 광전자로 효율적으로 바꾸기 위해 요드 세슘으로 코팅되어 있다. 1keV에서 이 탐지기의 유효 면적은 Einstein HRI보다 거의 4배 더 민감한 것으로 알려졌다.

56도 경사각으로 580km반경의 원궤도를 돌고 있는 이 위성은 위도 48도에 놓인 독일 바일하임 (Weilheim)이란 도시의 지상국을 지나가는데, 이곳에서 모든 위성자료들이 전송된다. 자료를 읽고 난 다음 그 다음 자료를 읽는데 걸리는 최대 시간은 18시간이다.

초기 전천 탐사 기능을 완수하고, 지금은 독일, 미국 그리고 영국이 관측시간을 나누어서 조준관측 기능을 수행하고 있다. 이들 국가들은 ROSAT를 작동하는데 주된 노력을 경주하고 있다. 관측자료들은 일반 관측자들에게 유용한 형태로 분포되고 있고, 자료분석에 필요한 소프트웨어 또한 대부분 컴퓨터 형태에서 사용될 수 있는 형태로 공개되어 있다.

낮은 X-선 에너지 영역에서 민감하기 때문에 ROSAT 관측은 많은 천체들에 대해 Einstein위성이나 EXOSAT위성이 이룩했던 것보다 상당한 발전을 이룩했다. 즉 더 많은 광자가 외부우하와 우리우하에 가까이 있는 천체로부터 집적될 수 있는 것이다.

ROSAT은 또한 광역 사진기(WFC, wide field camera)를 지니고 있다. 이 관측기기는 X-선 망원경과 평행으로 조준되어서 X-선 망원경으로 찍혀지는 X-선 하늘과 동시에 극자외선 하늘을 찍을 수 있게 고안되었다. 평균 찍혀지는 하늘 크기는 7.5도로서 약 475cm²의 기하적 크기에 해당한다. 이 영역의 하늘은 아직 많이 연구되지 않았다. 그래서 이 스펙트럼 영역에서의 관측은 경이적인 과학적 성과를 거두게 될 것이다.

그림 1은 ROSAT 위성의 사진으로, 오른쪽에 X-선 망원경이 붙어 있는데, 동심원 고리 구멍을 통해 X-선이 입사하여서, 위성 반대쪽에 붙어 있는 두개의 탐지기(PSPC와 HRI)에 의해 검출된다. WFC는 망원경 바로 밖에 붙어 있다. 표 1에 ROSAT에 부착된 관측기기의 제원을 나열하였다.

표 1. ROSAT위성에 탑재된 관측기기들의 제원(Charles & Seward 1995).

detector	Energy band(keV)	Field of view	Purpose	Effective area	Spatial resolution
PSPC	0.2 ~ 2	2°	survey	250@1keV	30"
HRI	0.2 ~ 2	0.6°	high res. imaging	160@1keV	4"
WFC	0.04 ~ 0.21	5°	survey	15@100Å	2"

ROSAT으로 얻어낸 관측자료들은 엄청난 학문적 도약을 초래하였다. PSPC는 매우 민감하고 낮은 배경잡음을 갖고 있어서 아주 희미한 퍼진 X-선 방출(diffuse emission)의 관측을 가능하게 하였다. 또한 우리우하에서의 퍼진 가시광 방출의 형태와 비슷한 낮은 에너지 X-선 배경복사에서의 구조, HI성간 구름의 모습, 은하단으로부터 방출구조, 그리고 새로운 초신성 잔해들이 새로 발견되어 연구되어지고 있고, 특히 전천 탐사에서 50,000개의 새로운 X-선 원이 발견되어 천문학의 새로운 장을 열어 주었다.

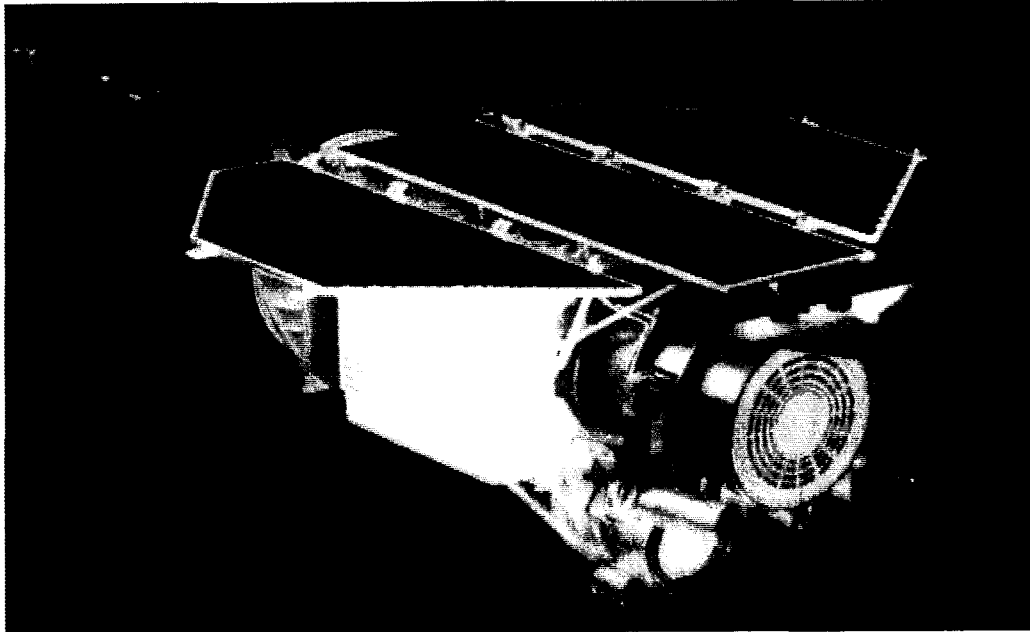


그림 1. ROSAT X-선 인공위성 모습(Charles & Seward 1995, 설명은 본문 참조)

2. 자기격변 변광성의 모델

ROSAT X-선 인공위성이 새로 발견한 X-선 원 중 100여개는 자기격변 변광성(magnetic cataclysmic variables)으로 추정되어 진다. Ritter & Kolb가 1993년에 발표한 격변 변광성 목록 중 자기격변 변광성이 20여개인 점을 감안하면 이 숫자는 아주 엄청난 숫자가 된다.

쌍성 구조계 중 주성이 백색왜성이고, 동반자 별이 만기형 주계열별로 구성된 구조계를 격변 변광성(cataclysmic variables)이라고 하는데 일반적으로 주계열별에 있는 물질들이 로시한계를 채우고 난 후 백색왜성 쪽으로 물질모임(accretion)이 일어나면서 백색왜성 주위에 모임원반(accretion disc)이 형성된다고 믿어진다. 실제 이들 별에서 관측되는 빛은 백색왜성 자체와 물질 모임원반, 뜨거운 반점은 동반별에서 방출되는 물질이 모임원반에 부딪쳐서 생기는 곳으로서 정지기일때만 관측이 되고, 방출기에는 원반에서 나오는 빛에 휩싸여서 분리되지 못한다.

백색왜성이 자기장을 지니고 있을 때의 격변 변광성을 자기격변 변광성이라 부르는데, 이 자기장은 모임원반의 형성을 방해하게 된다. 백색왜성의 자기장의 모임원반의 형성을 방해하는 정도에 따라 polar형(또는 AM Her형)과 intermedialge polar형(또는 DQ Her형, 이하 IP라 칭함)으로 분리되는데, 그림 2에 그 표준모델을 구분하여 나타내었다.

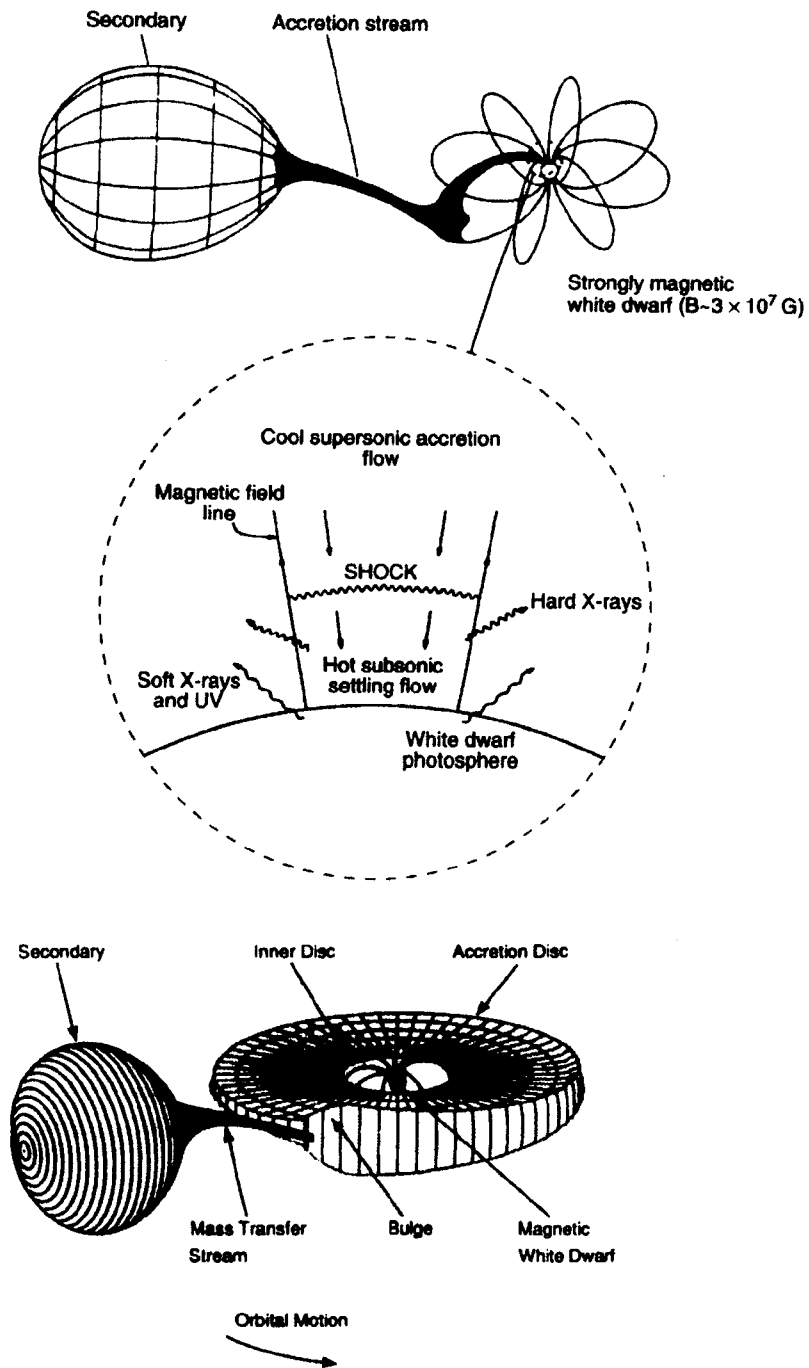


그림 2. 자기격변 변광성의 표준모델(위: polar형 별, 아래: IP형 별)

백색왜성의 자기장 세기가 너무 커서 모임원반이 형성되지 못할 때, 모여지는 물질은 (accreting matter)은 백색왜성의 자기장을 따라 직접 백색왜성의 표면에 떨어지는(그림 2의 위) 경우를 polar형 별이라 한다. 그림 2 위의 확대된 부분에 백색왜성의 표면에서 일어나는 물질모임 형태를 자세히 보였는데, 이 부분에서 물질은 거의 자유낙하를 하게 되어서, 아주 높은 속도를 지니게 된다. 이 높은 속도의 물질은 표면 위에서 강한 충격(shock)을 겪으면서 높은 에너지의 X-선(hard X-rays)을 방출한다. 이 hard X-선은 백색왜성 주변 표면을 가열시켜서 soft X-선은 백색왜성 주변 표면을 가열시키고, 이때 soft X-선과 UV영역에 재방출이 일어난다. 이런 polar형 별들에서 백색왜성은 공전주기와 같은 주기로 자전(synchronous rotation)한다는 것이 알려졌으나 그 원인에 대해서는 아직 많은 학자들이 서로 다른 의견을 보이고 있다.

백색왜성의 자기장이 적당히 크면, 그 자기구조의 크기가 모임원반의 형성을 방해하지 못하는 경우가 생기는데(그림 2 아래), 이런 구조계를 IP형 별이라 부른다. 이때는 라그랑지점을 통과한 물질이 백색왜성 주위에서 일단 모임원반을 형성하고, 모임원반을 통해 백색왜성 쪽으로 모여지는 동안 자기압이 물질 흐름을 제어할 수 있는 어느 부분에서부터 모임원반의 침투가 저지되고, 물질모임은 고리형태의 접촉부분에서 자기장을 따라 자기 극으로 향하게 된다. 이때 자기 극에서는 polar형 별에서와 마찬가지로 hard X-선 방출되고, 이렇게 방출되는 X-선은 공전주기와 자전주기 변조를 하는 것으로 관측되어 백색왜성의 공전주기와 자전주기가 다르다고 믿어진다.

polar형 별의 경우 Zeeman 효과나 사이클로트론파가 관측되어 자기장의 세기가 측정되지만, IP형 별의 경우 이들이 대부분 잘 관측되지 않아 자기장 세기는 직접 측정하지 못하고 있다. 그래서 대부분 학자들은 IP형 별의 자기장이 polar형 별의 자기장보다 약하다고 생각하고 있지만, Hameury et al.(1986) 같은 학자들은 이들 두 구조계가 같은 자기장을 지니고 있고, IP형 별에서 Zeeman 효과나 사이클로트론파가 검출되지 않는 것은 다른 이유에 있다고 주장한다.

3. 자기격변변광성에 대한 ROSAT의 역할

ROSAT X-선 위성은 많은 수의 자기격변 변광성을 새로 발견하여 격변 변광성의 연구에 큰 기여를 하고 있는데, 그 중에서도 polar형 별의 수를 50개 이상으로 증가시켰다는 점이 특이한 점이다.

이들 개별 구성원들에 대한 자세한 연구를 통해, 이 부류 전체의 성질을 알아볼 수 있기 때문에 중요하다. 격변 변광성의 공전주기 분포는 Ritter & Kolb(1993)에 의해 다시 정리되어 발표되었는데, ROSAT에 의해 발견된 자기격변 변광성 중 공전주기가 밝혀진 천체를 포함하여 분포다이아그램을 그려보면 그림 3과 같다. 동반별이 그 Roche 표면을 채우고 나서, $P_{orb} \sim 80$ min이 될때까지 각운동량 손실을 통해 더 낮은 공전주기 쪽으로 진화할

때, 공전주기 분포의 장주기 쪽에서 CV가 관측되게 된다. 그림 3에서 볼 수 있는 뚜렷한 특징 중의 하나는 2 hr와 3 hr 사이에 존재하는 "주기틈새(period gap)"이다. Verbunt & Zwaan(1981)은 자기격변 변광성이 중력복사 외에 아마 자기제동, 즉 동반별의 자기구조로부터 야기된 항성풍에 의해 각운동량을 잃게 된다고 주장하였다. 주기틈새에 대한 통상적인 설명은 동반별이 완전히 대류적이 되어서 자기 활동을 손실하게 될 때 $P_{orb} \sim 3$ hr에서 자기 제동이 멈춘다는 것이다. M 의 감소는 동반별을 열적 평형에서 이탈하게 하고, Roche 표면으로부터 수축하게 한다. 물질 운반은 중력복사가 $P_{orb} \sim 2$ hr에서 접촉상태를 재형성할 때 다시 시작된다. 그림 3의 주기분포는 앞으로 계속되는 자기격변 변광성 측광관측에 의해 보강되어 저야 할 것이고, 충분히 보강된 주기분포는 자기격변 변광성의 영년변화를 이해하는데 큰 도움을 줄 것이다.

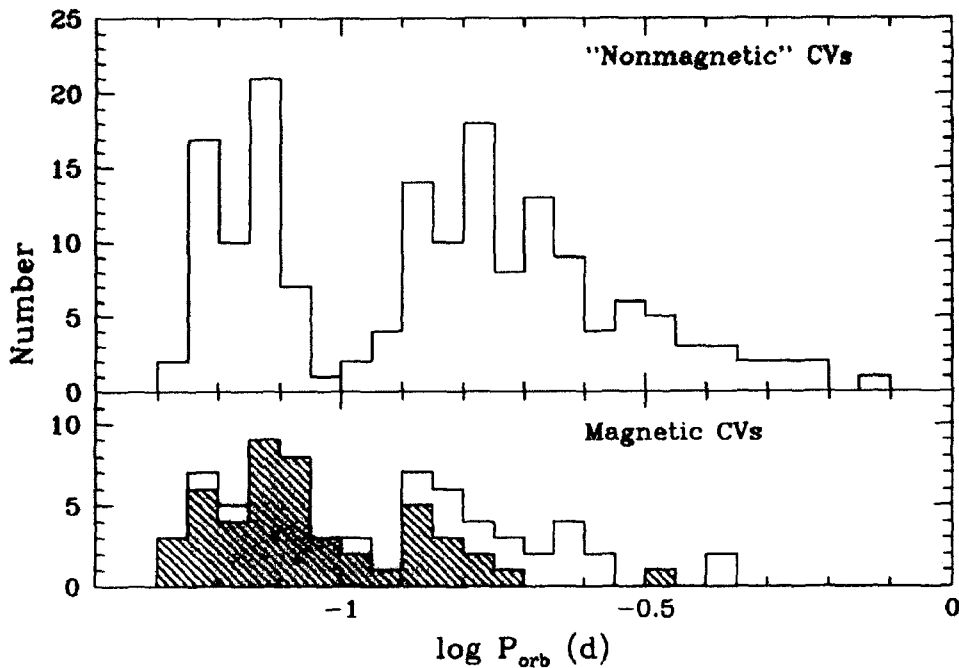


그림 3. 격변 변광성의 주기분포. 아래 그림에서 빗금친 부분이 polar형 별의 분포이고, 빗금치지 않은 부분은 IP형 별의 경우이다.

polar형 별의 자기구조가 항성풍 손실을 방해하고, 그래서 그들이 단순히 중력 복사에 의해서만 진화된다고 하는 제안도 있는데(Wickramasinghe & Wu 1994), 이 경우 주기틈새가 존재하지 않을 것이다. 관측적으로는 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 이런 제안을 반박하는 것 같다. 주기틈새를 $\log P_{orb}(\text{days}) = -0.90 \sim -1.05$ (2.1~3.1 hr)로 확장한다

면 틈새 아래에 있는 천체수, 틈새 사이에 있는 천체수, 그리고 그 상대비율은 비자기 CV에 대해 57, 7, 0.12 ± 0.05 가 되고, polar형 별에 대해 30, 5, 0.17 ± 0.08 이 된다. 이 두개의 상대비가 아주 다르지 않은 반면, 주기틈새 위에 있는 천체의 수는 비자기 CV에서보다 자기 CV의 경우가 훨씬 적다. 이는 polar형 별 뿐만 아니라 모든 자기격변 변광성에 대해서도 성립한다. 한가지 이유는 전형적인 CV가 $P_{orb} \sim 8$ hr에서 나타나는 반면 보통의 자기격변 변광성은 $P_{orb} \sim 4$ hr일때만 동시자전을 한다는 것이다. 그럼에도 불구하고 주기틈새의 존재는 비자기 CV에서도 주기틈새를 야기하는 똑같은 과정이 자기격변 변광성에도 또한 작용하고 있음을 나타내 준다.

자기격변 변광성에서 백색왜성의 자기장 세기와 구조는 구조계의 진화뿐만 아니라 물질 모임 기하와 복사성질에 대한 정보도 제공한다. 백색왜성 광도의 일부분에 기여하는 사이클로트론 복사는 충격 후 $\sim 10^8$ K로 뜨거워진 플라즈마로부터 나오는데, 심하게 넓어진 방출선 형태로 사이클로트론 주파수의 조화진동자 형태로 나타낸다. 약간의 특수 상대론적 보정을 거치면, 이 방출선의 분리 거리는 물질모임 반점의 자기장의 세기 B_{cyc} 을 직접 측정하게 해준다. ROSAT에 의해 새로 발견된 5개의 polar형 별들에서의 사이클로트론 선이 독일 괴팅겐대학 천문대의 Beuermann교수 연구팀 등 여러 학자들에 의해 집중적으로 관측, 분석되고 있어서 앞으로의 결과가 주목되고 있다.

물질모임 반점 주위에 있는 차가운 물질은 Zeeman 선들을 사이클로트론 방출선이 거의 연속 스펙트럼이 되게 하는 것 같다(Beuermann 1996). 이 효과는 물질모임 반점 주위와 광구의 약간 위에 있는 가스 halo의 자기장 세기 B_h 를 측정하게 해 준다. 또한 광구의 Zeeman 선들은 물질모임이 중지되거나, 반점이 백색왜성 뒤에서 가리워질 때 관측될 수 있다. 이 경우 보여지는 반구의 선 속에 평균된 자기장 \bar{B}_{phot} 이 측정되어 진다. 그런 측정들을 조합하면 백색왜성의 자기구조에 대해 알아 낼 수 있다. 방출과 흡수가 한쪽 극 주위에서 일어나고, 공간적으로 근접해서 일어나기 때문에 $B_h \sim B_{cyc} \sim B_{pole}$ 이라고 기대할 수 있다. 더구나 쌍극자 기하에서는 B_{pole} 이 \bar{B}_{phot} 보다 2배이상 될 것이다. 그러나 놀랍게도 어떤 구조계들에서는 \bar{B}_{phot} 가 B_{cyc} (또는 B_h)과 비슷하거나 상당히 큰 값이 되기도 하는데, 이는 표면 자기장이 쌍극자 기하가 아니라 다중극자임을 암시해 주는 결과이다.

그림 4는 지금까지 알려진 자기격변 변광성의 자기장 세기를 공전주기의 함수로 나타낸 그림이다. 여기에서 수직선은 IP형 별이 동시자전을 하면서 polar형 별로 진화하는 경계선이다. IP형 별에 대한 자기장 세기는 그림에서 열려진 원으로 표시되었는데, RX J1712에 대해선 8 MG와 약 9~21 MG의 두 값들이 존재한다. 자기격변 변광성의 사이클로트론 분광관측을 통해 계속적으로 자기격변 변광성의 자기장 세기 측정이 절실히 요구되고 있다.

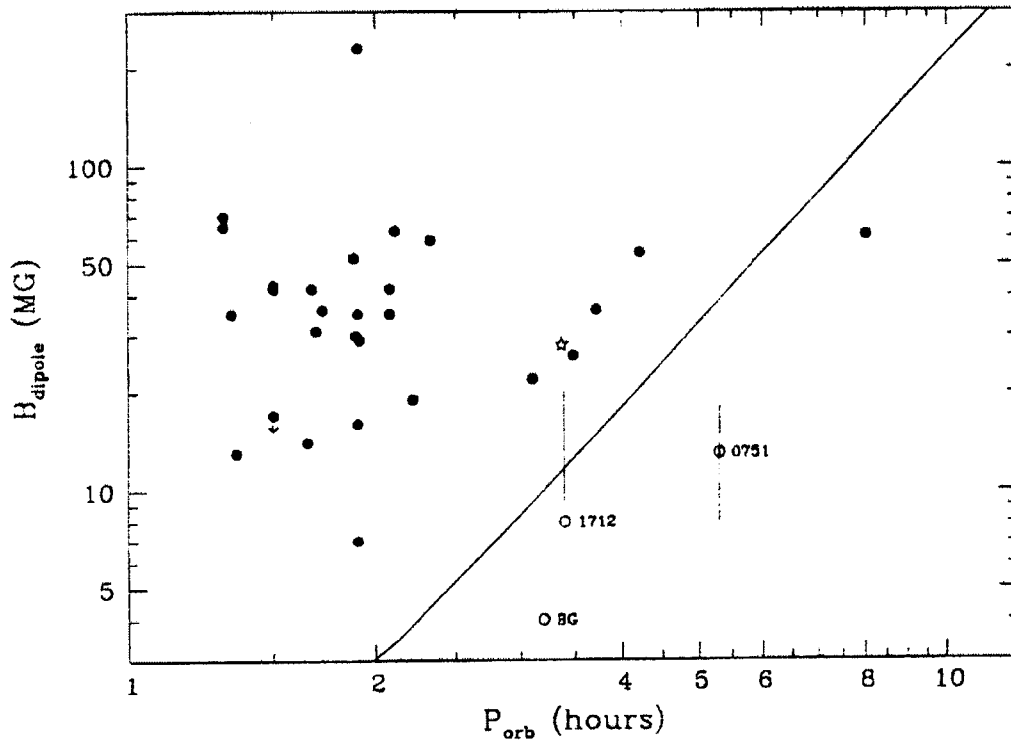


그림 4. 알려진 자기격변 변광성의 자기장 세기와 공전주기 분포

그림에서 보면 주 물질모임 영역에 대한 자기장 세기는 30 MG 주위에 모여 있다(표준 편차 15 MG). ~10 MG보다 낮은 자기장을 지닌 구조계는 없는 것으로 나타나는데 이는 아마 짧은 주기 구조계라도 이 값 아래서는 동시자전을 일으키지 못함을 나타낸다. 주 물질 모임 반점에서 자기장의 세기가 61 MG를 초과하지는 않는다. 이는 홀별 백색왜성은 500 MG를 넘는 자기장을 갖는다는 점에서 보면 놀라운 일이다. 강한 자기장을 갖는 자기격변 변광성의 결핍 현상에 대해서 Hamuery et al.(1988)은 강한 항성풍이 백색왜성 자기장과 결합이 되어서 빨리 진화를 거치기 때문에 발견될 확률이 적다고 주장하였다. 어떤 구조계에 대해서는 B_{cyc} 값이 2개 존재한다. 이 경우 사이클로트론 선이 두 물질모임 영역에서 방출됨을 의미한다. 이들이 서로 반대되는 영역에 놓여 있다면 자기장 세기가 ~2배정도 다르다는 것은 쌍극자 자기장과는 맞지 않는 현상이다. 또한 사이클로트론 선이 아예 관측되지 않거나(온도 broadening 때문에), 두 번째 극이 백색왜성 뒤에 가리워지는 구조계 들에서는 쌍극자 자기장이 좋은 어림이 아니라는 확증도 있다.

4. 앞으로의 전망

자기격변 변광성의 자기 구조에 대한 우리의 이해는 아직 완전하지 못하지만, 위에 언급한 바와 같이 ROSAT X-선 인공위성이 다수의 자기격변 변광성을 발견하고, 이들을 광학 관측으로 분석하면서 지난 4년동안 급격히 증진되고 있다. 앞으로 높은 물질모임을 하는 상태에서 사이클로트론 복사와 낮은 상태에서 Zeeman 흡수 스펙트럼을 관측하는 일은 앞으로 재미있는 결과들을 제공할 것으로 보인다. 편광 스펙트럼은 또한 자기장 기하를 구별하는데 필요한 추가정보를 제공하기도 한다. 앞으로 ROSAT 전천탐사에서 꾸준히 MCV의 후보자들을 찾아내고, 이들 후보자들을 광학적으로 동정해 보고, 또한 측광 및 분광관측을 통해 이들 천체의 공전주기 및 자전주기 그리고 자기장의 세기 등을 결정하는 연구가 계속 되어져야 한다. 우리 나라에서도 보현산 천문대의 1.8m 망원경을 이용하여 자기격변 변광성 후보자들의 측광 및 분광관측을 수행하고, ROSAT 전천탐사에서 새로운 자기격변 변광성 후보자들을 찾아내서 그들의 X-선 성질을 규명해 보려는 연구를 충북대 천문우주과학과에서 수행하고 있다. 특히 IP형 별들의 자기장의 세기는 아직 잘 알려져 있지 않은데, 이는 IP형 별들의 자기장 세기가 약해서 사이클로트론 복사파가 강하지 않기 때문에 이런 직접적인 방법으로는 결정될 수 있는 IP형 별들의 숫자가 제한된 형편이다. 만일 자기장 세기가 커서 사이클로트론 복사가 관측되는 IP형 별들이 발견된다면 자기격변 변광성의 진화, 특히 IP형 별이 동시자전을 이룩하여 polar형별로 진화한다는 모델에 큰 기여를 할 것으로 보인다.

참고문헌

- Beuermann K. 1996, 개인서신
Charles P. A. & Seward F. D. 1995, Exploring the X-ray Universe
(Cambridge Univ. Press: Cambridge)
Hameury J. M., King A. R. & Lasota J. P. 1986, MNRAS, 218, 615
Hameury J. M., King A. R. & Lasota J. P. 1988, MNRAS, 237, 848
Ritter H. & Kolb U. 1993, MPA preprint 757
Verbunt F. & Zwaan C. 1981, A&A, 100, L7
Wikramasinghe D. T. & Wu K. 1994, MNRAS, 266, L1